

# 루프구조를 이용한 효율적인 광펄스 스트림 발생에 관한 분석

박형근<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>남서울대학교 전자공학과

## Analysis of Effective Optical Pulse Stream Generation using Loop Scheme

Park Hyoung-Keun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Namseoul University

**요약** 본 연구에서는 효율적인 광펄스 스트림의 발생에 대해 분석하였다. 효율적인 광펄스 스트림의 발생을 위한 접근법은 광섬유 또는 도파관 지연 선로들에 대한 접근법과는 차이가 있다. 광펄스 스트림에서 사용된 결합기의 전달 대역폭보다 광펄스들을 분리하기 위한 대역폭이 더 클 경우 광펄스의 다중화 현상이 발생한다. 따라서 광결합기의 간격과 결합길이에 따른 파장분리 간격특성을 이용하여 입력 펄스의 스펙트럼폭과 광결합기의 전송대역폭과의 관계를 고찰함으로써 효율적인 광펄스 스트림을 발생시킬 수 있다.

**Abstract** In this paper, we made an analysis of the effective optical pulse stream generation. This is different from conventional approaches, which use fiber or waveguide delay line circuits. The optical pulse multiplication phenomenon occurs when the optical pulse's spectral width is greater than the transfer bandwidth of the coupler used. Therefore, the effective optical pulse stream generation can be controlled by using fiber couplers with different equivalent transfer bandwidths. The pulse separation spacing is controlled by number of cascaded coupler in optical loop mirror coupler scheme.

**Key Words** : Optical Pulse, Stream Generator, Transfer Bandwidth

### 1. 서론

통신망에서 낮은 전송손실을 갖는 광섬유가 개발된 후, 전기신호를 광신호로 변환하는 반도체레이저 기술이 발전함에 따라 광섬유 통신시스템이 통신망의 기반이 되었다.[1] 특히, 광통신 시스템에서 광소자들 중 광결합기를 광섬유만으로 제작할 수 있게 되면서 광통신 시스템에서 광신호처리를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2] 특히, 편광기, 광필터, 위상변조기, 광증폭기, WDM(Wavelength Division Multi-plexing) 광결합기 등의 소자가 실용화되었다. 또한 통신 시스템의 전송 속도를 높이기 위한 방법으로 짧은 펄스열을 생성하여 채널 별로 변조한 후 각 채널을 시간 축상에서 광학적으로 다

중화하여 전송함으로써 전송속도를 높이는 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[3] 이러한 초고속 광통신시스템을 구현하기 위해서는 반복율이 높은 광펄스를 발생시키는 장치가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 하나의 광섬유로 구성되는 루프 결합기를 이용하여 효율적인 펄스스트림을 발생시키기 위한 이론적인 해석과 모의실험을 수행하였다. 이러한 구조에서는 광펄스의 스펙트럼폭이 광결합기의 전송대역폭보다 클 때 광펄스가 분할되어 고반복율의 광펄스를 얻을 수 있고, 광결합기의 전송대역폭은 광결합기의 간격 또는 결합길이를 조정하여 수 mm까지 얻을 수 있으며, 다중루프구조로 구성할 경우에는 보다 높은 반복율을 가진 광펄스를 얻을 수 있음을 보였다.

본 논문이 논문은 2009년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*교신저자 : 박형근(phk315@nsu.ac.kr)

접수일 10년 03월 22일

수정일 10년 05월 11일

게재확정일 10년 05월 13일

## 2. 광 커플러 분석

광섬유의 기본모드에 대한 전체의 분포를 y방향으로 선택했을 때 거리에 따른 전계는 식 (1)과 같다.[4]

$$E_y = \begin{cases} \frac{J_0(Ur/a)}{J_0(U)} & r/a \leq 1 \\ \frac{K_0(Wr/a)}{K_0(W)} & r/a > 1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $U = k_f a = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$

$$W = \gamma a = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$$

독립된 광섬유에서의 파동방정식과 결합된 광결합기에서의 파동방정식은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla_t + k_0 n^2(x, y) - \beta^2 \Psi_{1,2} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\Psi_{1,2}$  : 독립된 광섬유의 전자계

$\beta_{1,2}$  : 독립된 광섬유의 전파상수

$$(\nabla_t + k_0 n_c^2(x, y) - \beta_{\pm}^2) \Psi_{\pm} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\Psi_{\pm}$  : 우모드와 기모드의 전자계

$\beta_{\pm}$  : 우모드와 기모드의 전파상수

$n_c(x, y)$  : 결합기의 굴절율 분포

식 (2)와 식(3)을 이용하여 결합기의 결합계수는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$C = \frac{k_0 \int_{A_p} (n_1 - N_2) \Psi_1 \Psi_2 dA}{\int_{A_{\infty}} (\Psi_1^2) dA} \quad (4)$$

여기서,  $C_+ \equiv C_- \equiv C$

광결합기에서 임의의 두 파장을 분리하고자 할 경우 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에서 결합계수가 각각  $C(\lambda_1) < C(\lambda_2)$ 이고 결합길이가  $L$ 일 때 각각  $S_1 = C(\lambda_1)L$ ,  $S_2 = C(\lambda_2)L$ 이라 하면 파장에 대한 결합모드 방정식은 식 (5)과 같다.

$$P(\lambda_1) = \sin^2 S_1 = 1 \text{ (or } 0) \quad (5)$$

$$P(\lambda_2) = \sin^2 S_2 = 0 \text{ (or } 1)$$

따라서 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 분리하기 위한 조건은 식 (6)과 같이 된다.

$$\text{조건 1: } \sin^2 S_1 = 0 \text{ 또는 } 1 \quad (6)$$

$$\text{조건 2: } |S_1 - S_2| = \pi/2 + q (q=0,1,2, \dots)$$

즉,  $\lambda_1$ 에서  $\sin^2 S_1 = 1$ 이고  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ 에서  $\sin^2 S_2 = 0$ 이면  $\Delta\lambda$ 의 파장구간 만큼 분리시킬 수 있다. 조건 1은 결합길이  $L$ 이 고정될 때 광결합기의 블록을 y축으로 수평 이동함으로써  $\lambda_1$ 의 신호를 100% 또는 0%의 결합이 발생하도록 조정함으로써 만족시킬 수 있다. 그러므로 두 파장과의 차이는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\lambda = \left| \frac{\pi}{2|(\partial C/\partial \lambda)L} \right|_{\lambda=\lambda_0} \quad (7)$$

조건 1을 만족하는 광결합기로 분리할 수 있는 두 파장간의 간격  $\Delta\lambda$ 는 중심파장에서  $|\partial C/\partial \lambda|$ 의 함수이며, 중심파장에서  $|\partial C/\partial \lambda|$ 을 얻기 위하여  $V$ 값이  $1.3 < V < 2.4$ 의 범위에서  $V$ 와  $W$ 와의 선형관계를 이용하여 모드 파라미터를 표현하면 식 (8)과 같이 된다.

$$W^2 \approx 1.306 V^2 - 2.276 V + 0.992 \quad (8)$$

$$U^2 \approx 1.306 V^2 + 2.276 V - 0.992$$

$$V = (2\pi a/\lambda)(n_{\infty}^2 - n_d^2)^{1/2}$$

여기서  $2\Delta = (n_{\infty}^2 - n_d^2)/n_{\infty}^2$ 을 의미하고  $\partial C/\partial \lambda$ 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\left| \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = X[A\lambda + B\lambda^2 + D\lambda^3] + Y[A + 2B\lambda + 3D\lambda^2] \quad (9)$$

여기서,  $a$  = 광섬유 반경

$d$  = 두 코어사이의 간격

$$X = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)} \right]$$

$$Y = \frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)}$$

$$A = -\frac{0.0487}{a^2 n_{\omega}^2}, \quad B = \frac{0.0576}{a^3 n_{\omega}^2 (2\Delta)^{1/2}}$$

$$D = \frac{-4 \times 10^{-3}}{a^4 n_{\omega}^3 (2\Delta)}$$

그러므로 평행하게 연마되어 결합된 형태의 광결합기에 대해서 식 (9)을 이용하면 중심파장에서  $|\partial C/\partial \lambda|$ 가 결정되며, 식 (7)에 의해서 파장간격을 결정할 수 있다. 파장분리 구간  $\Delta\lambda$ 는 식 (7)에서 결합길이가 파장에 대하여 일정하고  $|\partial C/\partial \lambda|$ 이 클수록  $\Delta\lambda$ 가 작아지므로 분해능이 좋아지고 두 코어사이의 거리를 선택하면 파장분리 구간  $\Delta\lambda$ 를 최소화할 수 있다.  $|\partial C/\partial \lambda|$ 의 최대가 되는 두 코어사이의 거리는 식 (10)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial d} \left[ \left| \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right| \right]_{\lambda_0} = \frac{\partial X}{\partial d} [A\lambda + B\lambda^2 + D\lambda^3] + \frac{\partial Y}{\partial d} [A\lambda + 2B\lambda + 3D\lambda^2] = 0 \quad (10)$$

광결합기의 루프 구조에서 정현적인 스펙트럼 전달 특성을 결합계수와 결합모드 방정식[5,6]을 이용하여 표현하면 식 (11)과 같다.

$$[C] = \sqrt{1-r} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) & j\sin\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) \\ j\sin\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) & \cos\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $r$ 은 결합기의 손실,  $f$ 는 광 주파수이고  $\Delta f$ 는 결합기 채널 간격의 절반과 동일한 광 주파수 간격이다. 따라서 광섬유 루프의 전송특성은 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [C] e^{j\psi} \quad (12)$$

$$= (1-r) \begin{bmatrix} j\sin\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) & \cos\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) & j\sin\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) \end{bmatrix} e^{j\psi}$$

여기서,  $T_{ij}$ 는 포트  $i$ 에서 포트  $j$ 까지 주파수 영역에서의 전송계수이고  $\psi$ 는 광섬유 루프 안에서 유기되는 위상 천이이다. 주파수의 확산관계는  $c = \lambda f$ 에서 광결합기의 전송대역폭을 선폭( $\Delta\lambda$ ) 향으로 표현하면 식 (13)

과 같이 주어진다.

$$\Delta f = \frac{\lambda^2 \Delta \lambda}{c} \quad (13)$$

주파수 영역에서 포트 1으로 들어오는 입력  $X_i$ 를 고려할때 주파수 영역에서의 출력은  $X_{out} = T_{12} * X_i$ 가 되며, 푸리에(Fourier) 역변환에 의해 일시적인 출력은 식 (14)와 같다.

$$x_{out} = t_{12} * x_i \quad (14)$$

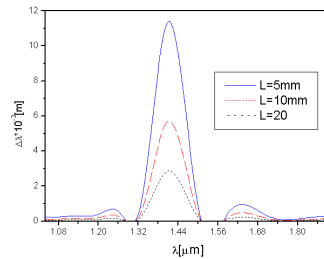
$$= [\delta'(t-\tau) + \delta'(t+\tau)] * \left( \frac{x_i * D}{2} \right)$$

여기서,  $\tau = 1/\Delta f$ 이고  $D$ 는 전파로 인한 펄스 확산 함수이다. 그리고  $\delta'$ 는 델타 함수이다. 루프의 길이가 짧기 때문에 광섬유 루프 결합기에서  $D$ 는 무시한다고 가정하면 입력펄스가  $\Delta f$ 보다 큰 대역폭을 가질 경우 입력 펄스보다 많은 펄스를 얻을 수 있으며,  $N$ 개의 동일한 광섬유 루프 결합기로 구성되면 협대역 파장분할 결합기를 실현할 수 있고 출력 펄스폭을 조절할 수 있다.

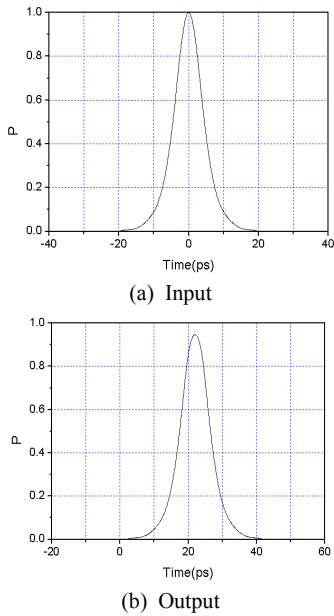
### 3. 모의실험 및 고찰

본 연구에서는 광섬유의 반경  $a = 4.07\mu\text{m}$ , 코어 굴절율  $n_1 = 4.18$ , 클래딩 굴절율  $n_2 = 4.17704$ 인 루프 구조의 광섬유 결합기에서 고 반복율에 대한 모의실험을 수행하였다.

그림 1은 두 코어사이의 거리와 중심파장에 따른 파장분리구간  $\Delta\lambda$ 를 식 (7)을 이용하여 나타낸 것으로 결합길이가 일정할 때  $|\partial C/\partial \lambda|$ 의 최대가 되는 두 코어사이의 거리를 선택하면 파장분리구간  $\Delta\lambda$ 를 최소화할 수 있는 것을 알 수 있다.



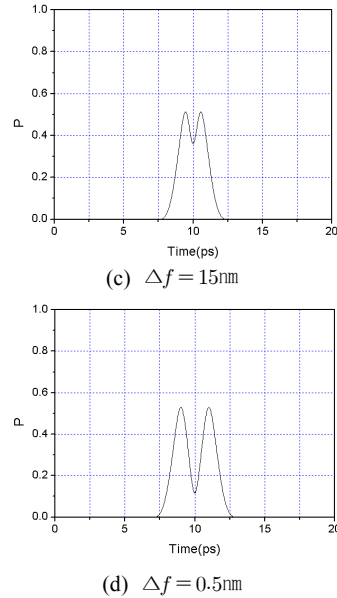
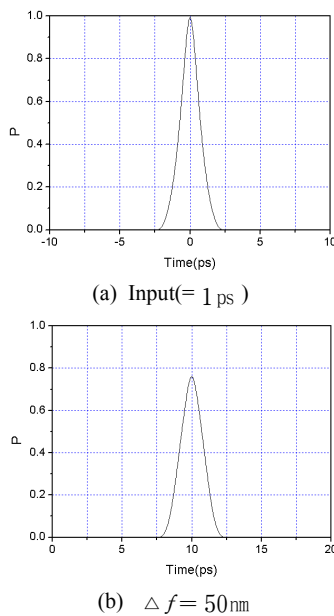
[그림 1]  $\Delta\lambda$ 와 중심 파장과의 관계



[그림 2]  $\Delta f = 8\text{nm}$ 인 광결합기의 입·출력

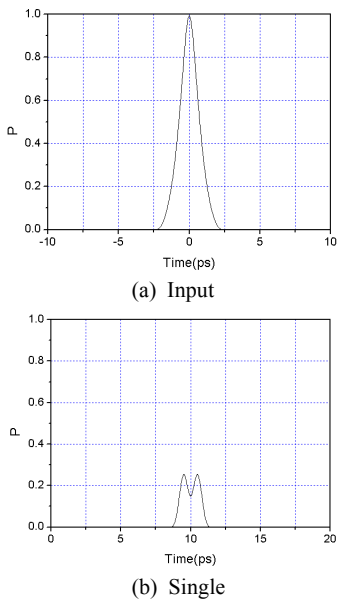
그림 2로부터 입력펄스가 루프 미러 광결합기의 전송 대역폭보다 작으므로 광펄스의 분할이 전혀 이루어지지 않았음을 확인 할 수 있다.

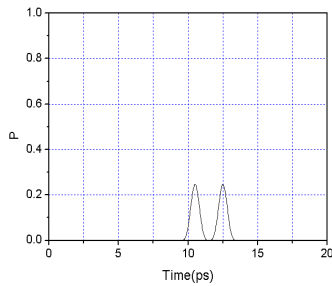
그림 3은 입력 펄스폭이 1ps인 경우,  $\Delta f$ 의 변화에 따른 3 dB 루프 미러 광결합기의 출력 펄스를 보인다.  $\Delta f$ 가 어느 일정한 값 이상으로 커질 경우, 입력 신호와 출력 신호가 동일하게 나타나는데, 이에 의해  $\Delta f$ 의 값이 루프 미러 광결합기의 중요한 요소임을 확인 할 수 있다.



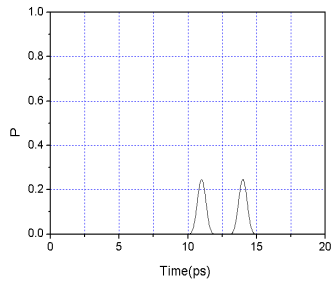
[그림 3]  $\Delta f$ 에 따른 광결합기의 출력

그림 3은  $\Delta f$ 가 5nm이하로 주어질 때 출력 펄스가 정확히 분할됨을 보이고 그림 4는 다중 루프 광결합기에 따른 전산모의실험 결과를 보이는데 이 때 루프 미러 광결합기의 전송대역폭( $\Delta f$ )은 8nm이다. 그림 4(a)는 펄스폭이 1ps인 입력 펄스를 보이고, (b)는 하나의 광결합기를 고려했을 때의 출력 펄스이다. (c)는 두개의 광결합기를 통과한 경우이고, 그리고 (d)는 세 개의 광결합기를 통과한 경우이다. 그림에서 보듯이 광결합기의 직렬연결에 의해 펄스 분리간격을 조절할 수 있음을 확인할 수 있다.





(c) Double



(d) triple

[그림 4]  $\Delta f = 8\text{nm}$ 의 광결합기의 수에 따른 출력

#### 4. 결론

본 논문에서는 광펄스 스트림의 효율적인 발생을 위해 루프구조를 이용하여 광결합기의 결합모드방정식을 바탕으로 광신호의 결합특성을 분석하였다. 광결합기의 간격과 결합길이에 따른 파장분리 간격특성을 이용하여 입력 펄스의 스펙트럼폭과 광결합기의 전송대역폭과의 관계를 고찰함으로써 효율적인 광펄스를 발생시킬 수 있음을 보였다.

본 논문에서 제안한 루프 광결합기의 출력을 모의실험한 결과 광섬유결합기의 전송대역폭에 따라  $1.5\mu\text{m}$  파장의 입력 펄스폭이 10ps 즉, 스펙트럼 폭이 0.8nm일 때에 대해 결합기의 전송대역폭을 8nm로 조절하여 하나의 펄스를 얻었다. 입력 펄스폭이 1ps 인 경우에 대해서는 전송대역 폭이 5nm 이하로 주어지는 경우에 만족할 만한 출력 펄스를 얻을 수 있었다. 또한, 펄스 간격은 루프 광결합기 구조에서 광결합기를 직렬로 연결하였을 때 광결합기의 직렬 연결수에 따라 펄스 분리간격을 조절할 수 있었다. 즉, 고 반복율을 갖는 펄스를 발생시키기 위한 루프 광결합기에서 가장 중요한 요소는 광결합기의 전송대역폭이고, 이 요소에 의해 고 반복율을 갖는 펄스를 발생, 조절할 수 있었음을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 구조는 단일 광섬유만으로 광결합

기와 루프를 구성할 수 있으므로 완전 광섬유 전송 시스템을 구현하는 데에도 이용할 수 있으리라 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] 김창민외, “광통신 시스템 및 네트워크”, 범한서적, 2006.
- [2] G. Keiser. "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 3rd ed. 2000.
- [3] 박영일의, “2.5Gbps, 8채널 광다중화 신호의123km 전송현장실험” Photonics conference'96, pp.183-184, 1996.
- [4] Clifford R. Pollock. " Fundamentals of Optoelectronics", Irwin, 1995. 853-858, July 1991.
- [5] E. A.Kuzin, B. I. Escamilla, P. R. Laguna, J. S. Momdragon, "Nonlinear Optical loop mirror with low birefringence twisted fiber in the loop", Optics Comm., 1998.
- [6] D. B. Mortimore, "Fiber loop reflectors," J. Lightwave Technology., Vol.6, No.7, pp.1217-1224, July 1998.
- [7] Cerecedo-Nunez HH. Trevino-Palacios CG. Kuzin EA.,“Coupling coefficient evaluation of a fiber directional coupler using an all-fiber Sagnac interferometer”, Optical Engineering, SPIE(US), Vol. 41 No. 3, 2002. 3.
- [8] Senthilkumaran P, Thursby G, Culshaw B, “Fiber-optic tunable loop mirror using Berry's geometric phase”, Optics Letters, Optical Society of America(US) , Vol. 25 No. 8, 2000. 4.

#### 박형근(Hyong-Keun Park)

[정회원]



- 1995년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1998년 5월 ~ 2001년 9월 : (주) 미디어서비스기술연구소 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

마이크로프로세서응용, 임베디드시스템, SOC